

Резистивный датчик газовой среды на основе мезопористых пленок MoS₂А.Б. Логинов,^{1,*} М.М. Куватов,¹ И.В. Сапков,¹ Р.Р. Исмагилов,¹ В.И. Клещ,¹ А.Н. Образцов¹¹Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова, физический факультет
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 05.11.2024; после доработки 16.11.2024; подписана в печать 27.11.2024)

Обладающие большой удельной поверхностью мезопористые пленки полупроводниковых материалов представляют интерес для решения проблемы создания датчиков окружающей газовой среды. В данной работе такие датчики изготовлены на основе материала, получаемого на массивных подложках в результате химической реакции между газообразным сероводородом (H₂S) и парами металла (Mo). С помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии установлено, что полученные слои представляют собой соединение MoS₂. С помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ) установлено, что материал, получаемый на подложках различного состава, представляет собой массив кристаллитов толщиной в единицы нанометров и поперечными размерами в несколько сотен нанометров. MoS₂-кристаллиты ориентированы преимущественно перпендикулярно подложке и разделены расстоянием в несколько десятков нанометров. Поверхностное электрическое сопротивление сформированных таким образом мезопористых слоев MoS₂ измерялось в зависимости от концентрации паров воды или аммиака в окружающей среде. Обнаружено, что электрическое сопротивление уменьшается с увеличением относительной влажности воздуха и концентрации паров аммиака. Профиль изменения электрического тока при изменении концентрации этих компонент в воздухе обладает экспоненциальной зависимостью с двумя постоянными времени. Характерные времена нарастания для случая с парами NH₃ составляют 0.9 и 17 с, а спада — 1.2 и 29 с, в то время как для случая с парами H₂O характерное время нарастания тока составляет 4 и 45 с, а время спада — 1.25 и 42 с. Обсуждаются механизмы увеличения электрической проводимости MoS₂ пленок при увеличении влажности воздуха и концентрации паров аммиака.

PACS: 81.15.Gh, 07.07.Vx. УДК: 539.23, 53.087

Ключевые слова: резистивный датчик газа, вертикально ориентированные MoS₂, нанопленки, газофазное химическое осаждение, CVD.

DOI: 10.55959/MSU0579-9392.80.2520501

ВВЕДЕНИЕ

Дихалькогениды переходных металлов (ДПМ), подобно графиту, принадлежат к семейству двумерных (2D) материалов с кристаллической структурой в виде слоев атомов. Слои удерживаются вместе за счет слабого Ван-дер-Ваальсового взаимодействия между слоями, в то время как внутри слоя атомы связаны прочными ковалентными связями. К классу ДПМ-материалов относятся полупроводники с химической формулой MX₂, где M — переходный металл, X — халькоген. В настоящее время наибольший интерес исследователей привлекают дихалькогениды металлов VI группы (Mo, W) в соединении с S или Se. Необходимо отметить, что такие ДПМ и в особенности, MoS₂ уже много лет применяются в различных отраслях промышленности в качестве смазки, позволяющей уменьшить трение элементов и узлов оборудования и, как следствие, продлить срок их эксплуатации (см. например, [1]). Сочетание двумерности и наличия запрещенной зоны сделало ДПМ идеальными кандидатами для создания новых электронных и фотонных

устройств следующего поколения [2]. Недавнее обнаружение яркой фотолюминесценции в 2010 г. [3] и создание первого транзистора в 2011 г. [4] на основе монослойного MoS₂ значительно усилил интерес научного сообщества к этому материалу и созданию на его основе различных устройств.

Конкретная конструкция функционального устройства требует контроля морфологии и свойств материалов на микро- и наномасштабе [5, 6]. Среди различных вариантов морфологии пленки, состоящие из квазидвумерных наноллистов MoS₂ (наностенок), ориентированных перпендикулярно поверхности подложки, особенно привлекательны для использования в качестве полых эмиттеров [7], основы для устройств сбора и хранения энергии (включая солнечные элементы, термоэлектрические устройства), для батарей и суперконденсаторов [8–10], различных датчиков и детекторов [11, 12]. Эта привлекательность прежде всего вызвана морфологическими особенностями таких наноструктур, их высокой пористостью и соответствующей высокой удельной площади поверхности. Существует множество методов, которые используются для получения таких мезопористых пленок, состоящих из наноллистов MoS₂, включая жидкофазное расслоение [13],

* E-mail: loginov.ab15@physics.msu.ru

гидротермальный синтез [14] и широкий спектр методов газофазного химического осаждения (chemical vapor deposition — CVD) (см., например, [15–17]). Каждый из перечисленных методов синтеза имеет свои преимущества и недостатки.

В настоящей работе наноструктурированные мезопористые пленки MoS_2 были получены с помощью недавно разработанного метода химического осаждения из газовой фазы [18] на различных подложках. Морфологические свойства были исследованы с помощью растровой электронной микроскопии (РЭМ). Элементный состав анализировался с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС). Резистивная чувствительность к концентрации паров воды и аммиака в окружающей газовой среде была исследована в специально изготовленной климатической камере.

1. МЕТОДЫ И МАТЕРИАЛЫ

Образцы MoS_2 были получены с помощью недавно разработанной CVD установки, подробно описанной ранее [18]. Осаждение производилось в вакуумной камере реактора оборудованной газовым и электрическим вводами (см. рис. 1.). В качестве источника серы используется газообразный сероводород, а в качестве источника молибдена — нити молибдена, материал которых испарялся при нагреве за счет омического тепла, выделявшегося при пропускании через нити электрического тока. Сероводород через игольчатый клапан поступает в реакционную камеру, предварительно откачанную форвакуумным насосом до базового давления ниже 10^{-2} мбар. Поток сероводорода направляется кварцевой трубкой на массив параллельных нитей Mo. Семь нитей Mo толщиной 60 мкм резистивно нагреваются постоянным током. Температура нитей, измеряемая оптическим пирометром, поддерживается на уровне 1500°C . Постепенное испарение нагретых нитей обеспечивает поступление в газовый поток атомов металла. Сероводород, который обдувает нагретые нити, частично разлагается на водород и серу. Подложка располагается перпендикулярно (или под некоторым углом) к общему потоку газа на определенном расстоянии от нагретых нитей. Температура подложки также поддерживается на определенном уровне с помощью специального нагревателя. В процессе осаждения давление в реакционной камере поддерживается постоянным на уровне 0.7 мбар за счет регулируемой компенсации скоростью откачки поступающего потока газа, а также внутренних источников повышения давления в виде испаряемого металла, продуктов химических реакций и др. Найденные эмпирическим путем оптимальные условия обеспечивают осаждение MoS_2 -пленок.

В качестве подложек использовались полированные пластины Si с кристаллографической ориентацией поверхности (100) и (111), те же пластины Si (100) и Si (111) с оксидным слоем толщиной 300 нм,

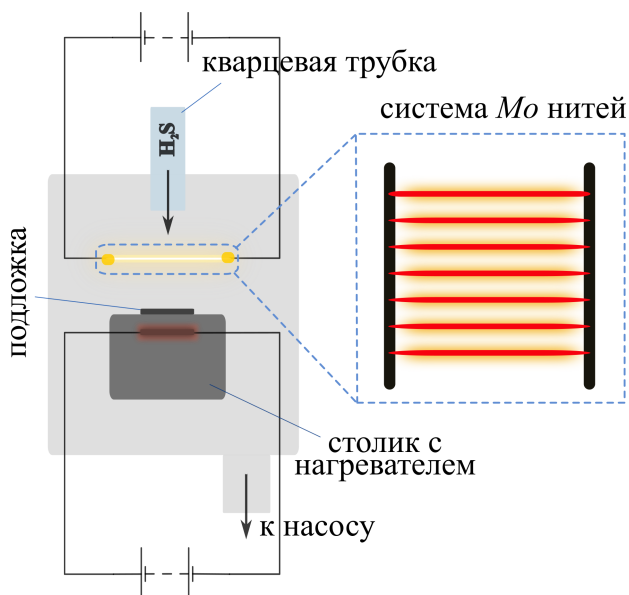


Рис. 1. Схема реакционной камеры CVD. Поток сероводорода, поступающего в камеру по кварцевой трубке, направляется на систему раскаленных параллельных нитей из Mo. При определенных условиях осуществляется синтез наностенок MoS_2 на поверхности подложки

пластины из плавного кварца, пластины из плавного кварца с пленкой Mo толщиной 3 нм, нанесенной методом магнетронного напыления, свежесколотая слюда, поликристаллическая корундовая керамика с размером зерен 1–10 мкм, та же керамика с электролитически нанесенным слоем Pt, углеродные наностенки, выращенные методом плазмохимического осаждения из газовой фазы [19]. Процесс синтеза MoS_2 осуществлялся при одинаковых параметрах роста для всех типов подложек: температура подложки составляла 700°C , сила постоянного тока 0.83 А/на каждую молибденовую нить, расстояние от поверхности подложек до нитей — 5 мм. В дальнейшем описании, если другое не указано явно, по умолчанию образцы соответствуют тем, которые были осаждены на SiO₂/Si (т.е. Si-ориентации (100) с оксидным слоем SiO₂ 300 нм).

Полученные образцы пленок исследовались с помощью растрового электронного микроскопа (РЭМ, Supra 40, Carl Zeiss). Элементный качественный и количественный состав анализировался с помощью рентгеновской фотоэлектронной спектроскопии (РФЭС, Kratos Axis Ultra DLD). Шкала энергий связи была предварительно откалибрована по положению пика C1s — 285.0 эВ. Использовалось характерное излучение алюминиевого анода — дублет AlK_α, который соответствует величине энергии 1486.6 эВ и имеет полуширину примерно 0.85 эВ. Методом РФЭС исследовались мезопористые пленки, выращенные на Si-ориентации (100).

С целью определения резистивной чувствительности осажденных пленок MoS_2 на изменение относительной влажности воздуха и концентрации па-

ров аммиака было изготовлено несколько прототипов устройств. Наностенки MoS_2 были синтезированы на подложке Si/SiO_2 толщиной 300 нм, на которую предварительно были нанесены электроды Au/Ti (Au сверху) с встречно-штыревыми контактами. Зазор между электродами составил 7 мкм, а общая длина контакта — 3330 мкм. Измерения отклика датчика на базе MoS_2 производились в специально созданной климатической камере. Уровень влажности изменялся с помощью ультразвукового увлажнителя, расположенного внутри закрытой камеры. В качестве эталона и обратной связи использовался коммерчески доступный датчик температуры и влажности (SHT3x-DIS) с точностью определения относительной влажности 1.5%. Температура воздуха в камере и окружающем пространстве поддерживалась на уровне 24°C.

Исследования электрического отклика пленки на пары аммиака производилась в той же камере. В камеру помещалась чашка Петри диаметром 90 мм, наполненная водным раствором аммиака определенной концентрации (10%, 0,9% или 0,4%), что приводило к изменению концентрации аммиака в климатической камере. При каждой замене раствора аммиака камера предварительно продувалась воздухом из окружающей среды. Измерительная ячейка с MoS_2 пленкой помещалась в камеру спустя 3–5 мин после помещения чашки Петри с новым раствором в камеру. Этого времени было достаточно, чтобы давление паров аммиака в камере выходило в режим насыщения и соответствовало давлению насыщенных паров водных растворов аммиака. Температура воздуха в камере и окружающем пространстве также поддерживалась на уровне 24°C.

В качестве электрического (резистивного) отклика MoS_2 пленки измерялся ток, проходящий через пленку при постоянном приложенном напряжении 0.3 В. Измерение тока и подача напряжения осуществлялись с помощью пикоамперметра Keithley 6487.

2. РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Исследования образцов, изготовленных на плоских подложках, с помощью РЭМ показали, что они представляют собой однородные пленочные образования, равномерно покрывающие всю поверхность подложки. РЭМ-изображения выявили практически идентичную морфологию осажденных пленок для подложек с одинаковой гладкостью их исходной поверхности (полированный Si , плавленый кварц и магнетронно распыленный слой Mo толщиной 3 нм на плавленом кварце).

Примеры типичных РЭМ-изображений пленок, полученных при указанных условиях на подложках разного типа, представлены на рис. 2. Как видно из рис. 2, в, г, полученные образцы состоят из кристаллитов MoS_2 нанометровой толщины, ориентированных перпендикулярно поверхности под-

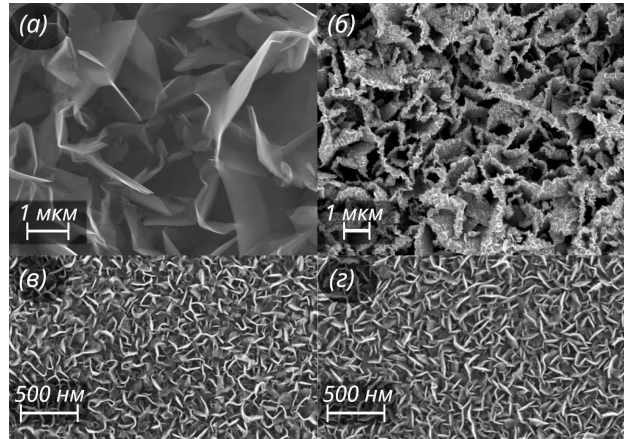


Рис. 2. Типичные РЭМ-изображения, демонстрирующие возможность нанесения вертикально ориентированных MoS_2 на различные подложки. РЭМ-изображение углеродных наностенок (а) до и (б) после нанесения вертикально ориентированных нанолистов MoS_2 . В качестве «ровных» подложек использовались: в — полированный кремний, г — плавленый кварц

ложки. Поперечные размеры кристаллитов (высота и длина), определенные по свежим сколам, составляют ~ 100 нм. Кристаллиты такой формы и размеров называются нанолитами, наностенками, чешуйками, хлопьями и т.п.

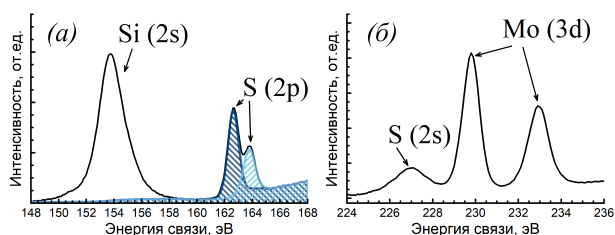
Средний размер чешуек и расстояние между ними почти не зависели от гладкости подложки. Эта независимость была отмечена даже на очень развитой и сложной поверхности, включая пленки, полученные на поверхности Si подложки, предварительно покрытой углеродной пленкой, состоящей из кристаллитов графита нанометровой толщины (также называемых наностенками), которые на РЭМ-изображениях имеют форму чешуек большего размера (см. рис. 2, а, б). Пленки углеродных наностенок были получены в плазме тлеющего разряда из метан-водородной газовой смеси, активированной разрядом постоянного тока (см. детали [19]). Использование таких наноуглеродных пленок позволяет увеличить удельную площадь поверхности MoS_2 материала, однако в данной работе чувствительность таких пленок к газовому окружению не исследовалась, а их изучение ограничивалось сравнительным анализом структурно-морфологических особенностей. Следует отметить, что существенных морфологических изменений поверхности углеродных наностенок не наблюдалось после их нахождения в реакционной камере в «экстремальных» условиях, соответствующих осаждению MoS_2 . Средние размеры осажденных чешуек MoS_2 аналогичны наблюдаемым в случае гладких подложек (Si , кварц и т.д.).

РФЭС-исследование, проводившееся для пленок, осаждавшихся на кремниевые подложки, подтвердило предполагаемый химический состав (MoS_2) наблюдаемых в РЭМ наностенок. Относительная концентрация элементов, энергия связи в спектрах

Таблица. Относительная к Мо концентрация элементов, энергия связи в спектрах РФЭС высокого разрешения и соответствующие им типы связей

| Линия | Относительное к Мо содержание элемента | Энергии связи, эВ | Тип связи | |
|--------|--|-------------------|-----------|------------------|
| Si(2p) | 12.59 | 99.5 | 2p3/2 | Si |
| | | 100.1 | 2p1/2 | |
| | | 102.4 | 2p3/2 | Si-S |
| | | 103.0 | 2p1/2 | |
| | | 103.7 | 2p3/2 | Si |
| | | 104.3 | 2p1/2 | |
| S(2p) | 2.30 | 162.6 | 2p3/2 | MoS ₂ |
| | | 163.8 | 2p1/2 | |
| Mo 3d | 1.00 | 229.8 | 3d5/2 | MoS ₂ |
| | | 232.9 | 3d3/2 | |

РФЭС высокого разрешения и соответствующие им типы связей представлены в таблице. Спектры представляли собой суперпозицию только ожидаемых пиков (см. рис. 3): линии кремния Si, который соответствует материалу подложки; пики молибдена Mo и серы S, которые соответствуют MoS₂ природе пленок, а также второстепенные для этой работы линии кислорода и углерода, которые обусловлены присутствием естественного окисла кремния и адсорбцией молекул газа, органических включений при хранении образца на воздухе.


 Рис. 3. РФЭС-спектры высокого разрешения образцов MoS₂: *a* — линии Si(2s) и S(2p); *б* — линии Mo(3d) и S(2s)

С целью изучения чувствительности к газовой окружающей прототипа MoS₂-датчика были проведены динамические измерения электропроводности, в которых резким образом менялась относительная влажность окружающей среды. Отклик электропроводности датчика регистрировался как функция времени при изменении относительной влажности в диапазоне 60–100%. На рис. 4, *б* показано изменение протекающего тока датчика (что пропорционально изменению проводимости пленки MoS₂) от времени при фиксированном приложенном напряжении (0.3 В) и комнатной температуре (24 °С) как функции относительной влажности. На рис. 4, *а* показан типичный одноступенчатый профиль тока датчика. Этот профиль обладает экспоненциальной зависимостью с двумя постоянными времени ($\sim 1 - A_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} - A_2 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_2}}$ для восходящей

части профиля и $\sim B_1 \cdot e^{-\frac{t}{\tau_1}} + e^{-\frac{t}{\tau_2}}$ для нисходящей части профиля; $A_1, A_2, B_1 > 0$). Типичное время нарастания составляет 4 и 45 с, а типичное время спада — 1.25 и 42 с.

На рис. 4, *в, г* представлены зависимости силы протекающего в MoS₂ пленке тока от времени при изменении концентрации паров аммиака в климатической камере. Концентрация аммиака в водном растворе изменялась в пределах 0.4–10%. Как и в случае изменения влажности, профиль отклика имеет экспоненциальную зависимость с двумя постоянными времени (см. рис. 4, *в* с одноступенчатым профилем). Типичные времена нарастания составляют 0.9 и 17 с, а типичные времена спада — 1.2 и 29 с.

Из представленных зависимостей видно (см. рис. 4), что абсолютная величина изменения силы тока при вариации концентрации паров аммиака в камере значительно выше изменения силы тока при изменении влажности воздуха. Кроме того, наблюдается положительная корреляция изменения проводимости пленки и концентрации паров NH₃ (или H₂O), другими словами, при повышении концентрации паров NH₃ (или H₂O) повышается электрическая проводимость пленки MoS₂. Положительную корреляцию можно объяснить тем, что молекулы H₂O могут проявлять себя как акцепторы или доноры электронов, в зависимости от условий эксперимента и природы чувствительной пленки [20, 21], а молекулы NH₃ являются донорами электронов [22]. Опираясь на полученные экспериментальные результаты, естественно предположить, что в рассматриваемой системе молекулы H₂O, подобно NH₃, выступают в качестве доноров электронов. Предложенный механизм, определяемый акцепторно-донорными процессами, может иметь место в случае, если изучаемые полупроводниковые MoS₂-пленки имеют *n*-тип проводимости. Для выяснения этого обстоятельства было проведено дополнительное исследование зависимости электрического тока, протекающего через MoS₂-пленку от напряжения,

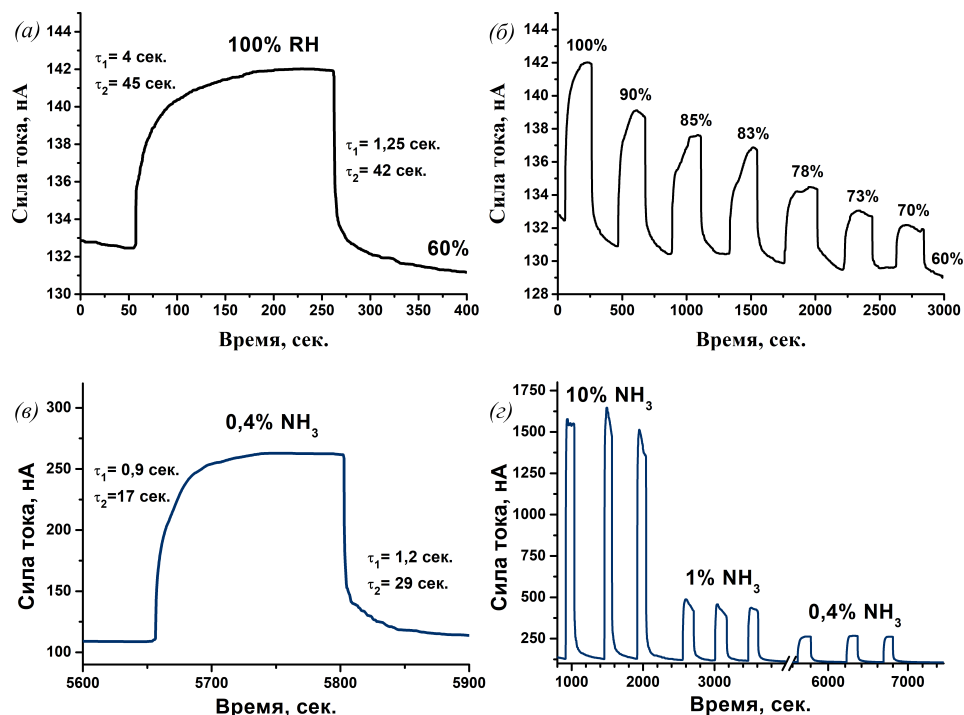


Рис. 4. Графики зависимостей отклика прототипа сенсора от времени при (а–б) вариации относительной влажности воздуха и при (в–г) изменении концентрации аммиака (нашатырного спирта) в окружающей среде

прикладываемого к дополнительному электроду (полевого затвора) на обратной стороне подложки (см. рис. 5). Регистрируемое при определенном знаке потенциала затвора уменьшение тока соответствует n -типу проводимости синтезированных полупроводниковых пленок MoS_2 . Значительный большее изменение проводимости пленок под воздействием паров NH_3 в сравнении с молекулами H_2O связан с эффективностью передачи электронов молекулами NH_3 , что согласуется с литературными данными [22].

Необходимо отметить, что в литературе также представлен альтернативный механизм, с помощью которого непротиворечивым образом может объясняться наблюдаемая корреляция между изменением проводимости пленки и влажности воздуха. Так, например, увеличение проводимости при повышении влажности воздуха наблюдали в следующих резистивно-чувствительных системах: наностенки MoS_2 на тонком графите [22]; чернила для аэрозольной печати с содержанием включений MoS_2 в виде наноструктурированных хлопьев [23]; гетеропереход MoS_2/Si -нанопроволки [24]; дендритоподобная наноструктурированная MoS_2 структура [25]; композит, состоящий из наностенок MoS_2 и оксида графена [26]. Авторы этих работ утверждают, что в рассматриваемых системах реализуется механизм Гроттуса (Grotthuss) [27], который заключается в прыжковой миграции протонов по воде согласно $\text{H}_3\text{O}^+ + \text{H}_2\text{O} > \text{H}_2\text{O} + \text{H}_3\text{O}^+$, где мигрирующий H^+ -протон перескакивает с одной молекулы H_2O (превращая ее в H_3O^+) на другую молекулу H_2O . Увеличение концентрации паров мо-

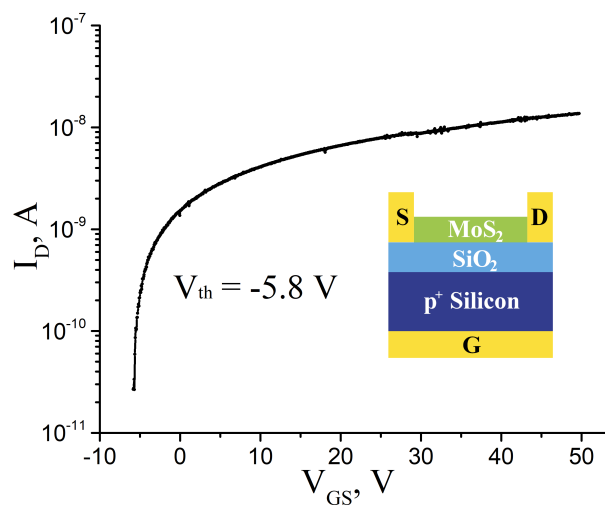


Рис. 5. Сток-затворная вольт-амперная характеристика прототипа полевого транзистора на основе синтезированных MoS_2 пленок: V_{GS} — напряжение затвора, I_D — ток стока (между истоком S и стоком D)

лекул H_2O в воздухе усиливает этот механизм, например посредством увеличения количества «водных» каналов проводимости в мезопористой пленке MoS_2 . Однако в наших исследованиях увеличение проводимости MoS_2 пленки наблюдалось также при увеличении концентрации паров NH_3 , для которого аналогичных механизмов в литературе обнаружено не было.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе путем термического разложения газообразного H_2S и резистивного распыления Мо нитей были синтезированы наноструктурированные пленки MoS_2 на различных подложках. Полученные образцы состоят из пластинчатых кристаллитов MoS_2 нанометровой толщины, преимущественно ориентированных перпендикулярно поверхности подложки. Поперечные размеры вертикально ориентированных наночастиц MoS_2 (высота и длина) составляют ~ 100 нм. Формируемые такими кристаллитами мезопористые наноструктурированные MoS_2 пленки чувствительны к парам H_2O и NH_3 , что проявляется в уменьшении электрического сопротивления с увеличением относительной влажности воздуха и концентрации паров аммиака. Изменения тока, протекающего через пленки при

резком изменении концентрации паров, обладают экспоненциальной зависимостью с двумя постоянными времени. Характерные времена нарастания для случая с парами NH_3 составляют 0.9 и 17 с, а спада — 1.2 и 29 с, в то время как для случая H_2O составляет 4 и 45 с, а время спада — 1.25 и 42 с. Увеличение проводимости при увеличении влажности воздуха и концентрации паров аммиака может быть объяснено в рамках донорно-акцепторной модели.

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 23-22-00132), <https://rscf.ru/project/23-22-00132/>. Также выражается благодарность за поддержку Фонду развития теоретической физики и математики «БАЗИС» (грант № 21-2-10-34-1). В работе использовалось оборудование Учебно-методического центра литографии и микроскопии МГУ им. М.В. Ломоносова.

- [1] Vazirisereshk M.R., Martini A., Strubbe D.A., Baykara M.Z. // *Lubricants*. **7**, N 7. 57 (2019).
- [2] Mak K.F., Shan J. // *Nature Photon.* **10**, N 4. 216 (2016).
- [3] Splendiani A. et al. // *Nano Lett.* **10**, N 4. 1271 (2010).
- [4] Radisavljevic B., Radenovic A., Brivio J. et al. // *Nature Nanotech.* **6**, N 3. 147 (2011).
- [5] Peng Z., Chen X., Fan Y. et al. // *Light Sci. Appl.* **9**, N 1. 190 (2020).
- [6] Shu X. et al. // *Appl. Phys. Lett.* **124**, N 18. 181101 (2024).
- [7] Giubileo F. et al. // *Nanomaterials*. **9**, N 5. 717 (2019).
- [8] Fan F.R., Wang R., Zhang H., Wu W. // *Chem. Soc. Rev.* **50**, N 19. 10983 (2021).
- [9] Bongu C.S., Arsalan M., Alsharaeh E.H. // *ACS Omega*. **9**, N 13. 15294 (2024).
- [10] Khan M.Q., Ahmad K., Raza W. et al. // *Catalysts*. **14**, N 2. 107 (2024).
- [11] Jin X.-F. et al. // *Sensors and Actuators A: Physical*. **316**. 112388 (2020).
- [12] Shukla P., Gond R., Singh P. et al. Vertically Aligned 2-D MoS_2 based High Performance Humidity Sensor. / in 2024 8th IEEE Electron Devices Technology & Manufacturing Conference (EDTM), Bangalore, India: IEEE, Mar. 2024, pp. 1–3.
- [13] Bang G.S., Nam K.W., Kim J.Y. et al. // *ACS Appl. Mater. Interfaces*. **6**, N 10. 7084 (2014).
- [14] Li R., Liang S., Aihemaiti A. et al. // *Appl. Surf. Sci.* **631** 157461 (2023).
- [15] S.-Y. Cho et al. // *ACS NaN.* **9**, N 9. 9314 (2015).
- [16] Deokar G. et al. // *Nanoscale*. **9**, N 1. 277 (2017).
- [17] Costa R.G., Barbosa A.D.N., Maia Da Costa M.E.H., Freire F.L. // *Vibrational Spectroscopy*. **123** 103454 (2022).
- [18] Loginov A.B. et al. // *Physica Status Solidi (b)* **2200481** (2022).
- [19] Kleshch V.I. et al. // *Phys. Status Solidi B*. **255**, N 1. 1700270 (2018).
- [20] Deokar G. et al. // *Sensors and Actuators B: Chemical*. **305**. 127458 (2020).
- [21] Korotchenkov G.S. Handbook of humidity measurement: methods, materials and technologies. Boca Raton: CRC press, Taylor & Francis group, 2018.
- [22] Tripathi M. et al. // *Nanoscale Horiz.* **9**, N 8. 1330 (2024).
- [23] Pereira N.M. et al. // *ACS Omega*. **7**, N 11. 9388 (2022).
- [24] Lou Z. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. **726**. 632 (2017).
- [25] Ren J., Guo B., Feng Y., Yu K. // *Physica E: Low-dimensional Systems and Nanostructures*. **116**. 113782 (2020).
- [26] Burman D., Ghosh R., Santra S., Guha P.K. // *RSC Adv.* **6**, N 62. 57424 (2016).
- [27] Agmon N. // *Chem. Phys. Lett.* **244**, N 5–6. 456 (1995).

 Resistive gas sensor based on mesoporous MoS_2 films

A.B. Loginov^a, M.M. Kuvatov, I.V. Sapkov, R.R. Ismagilov, V.I. Kleshch, A.N. Obraztsov

Faculty of Physics, Lomonosov Moscow State University. Moscow 119991, Russia

E-mail: ^aloginov.ab15@physics.msu.ru

Semiconducting mesoporous films with high specific surface area are of great interest for development of gaseous media sensors. In this work such sensors were fabricated using material synthesized on different substrates via chemical reaction between gaseous H_2S and Mo vapor obtained by thermal evaporation. By X-ray photoelectron spectroscopy chemical composition of MoS_2 was confirmed. By the use of scanning

electron microscopy it was revealed that deposited on different substrates films consist of an array of crystallites of nanometer thickness and transversal dimensions of several hundreds of nanometers. MoS₂ crystallites are oriented predominantly perpendicularly to substrate surface and spaced by distance of several dozens of nanometers. It was discovered that electrical resistivity of MoS₂ decrease with increasing of air humidity and NH₃ vapor concentration. Response profile has exponential time dependence and has two time constants. Characteristic rise times for NH₃ vapor case are 0.9 and 17 s, and fall times – 1.2 and 29 s. In case of H₂S vapor rise times are 4 and 45 s, and fall times – 1.25 and 42 s. Mechanisms of increasing in electrical conductivity with increasing air humidity and NH₃ vapor concentrations are discussed.

PACS: 81.15.Gh, 07.07.Vx.

Keywords: resistive gas sensor, vertically oriented MoS₂, nanofilms, chemical vapor deposition, CVD.

Received 05 November 2024.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 5. Pp. .

Сведения об авторах

1. Логинов Артем Борисович — аспирант; тел.: (495) 939-10-13, e-mail: loginov.ab15@physics.msu.ru.
2. Куватов Мунир Мударисович — студент; тел.: (495) 939-10-13, e-mail: munir-2001@mail.ru.
3. Сапков Иван Владимирович — мл. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-13, e-mail: ivan.sapkov@gmail.com.
4. Исмагилов Ринат Рамилович — канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 939-10-13, e-mail: ismagil@polly.phys.msu.ru.
5. Клец Виктор Иванович — доктор физ.-мат. наук, ст. науч. сотрудник; тел.: (495) 39-10-13, e-mail: klesch@polly.phys.msu.ru.
6. Образцов Александр Николаевич — доктор физ.-мат. наук, доцент, профессор; тел.: (495) 939-10-13, e-mail: obraz@polly.phys.msu.ru.